

⑯ ⑯ Offenlegungsschrift  
⑯ ⑯ DE 41 00 646 A 1

⑯ ⑯ Int. Cl. 5:  
H 02 H 7/26  
G 01 R 21/00  
G 01 R 21/133  
G 01 R 19/02  
H 02 J 3/24

⑯ ⑯ Aktenzeichen: P 41 00 646.1  
⑯ ⑯ Anmeldetag: 11. 1. 91  
⑯ ⑯ Offenlegungstag: 24. 9. 92

DE 41 00 646 A 1

⑯ ⑯ Anmelder:

Licentia Patent-Verwaltungs-GmbH, 6000 Frankfurt,  
DE

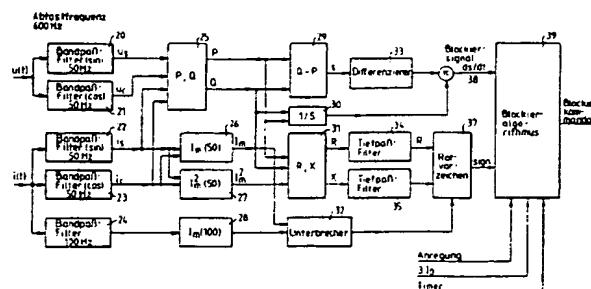
⑯ ⑯ Erfinder:

Machowski, Jan, Prof. Dr.-Ing.,  
Warszawa/Warschau, PL; Nelles, Dieter, Prof.  
Dr.-Ing., 6242 Kronberg, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑯ ⑯ Verfahren und Anordnung zum Erkennen von Leistungspendelungen und zum Schutz von  
Distanzschutzeinrichtungen vor unerwünschter Auslösung

⑯ ⑯ Distanzschutzeinrichtungen messen die Impedanz des  
Netzes von ihrem Einbauort aus gesehen. Bei Kurzschlägen  
unterschreitet diese einen vorgegebenen Grenzwert, d. h. sie  
bewegt sich in einem Auslösebereich der R-X-Ebene. Nach  
Kurzschlägen, die außerhalb des Schutzbereiches der  
Schutzeinrichtung liegen, kommt es zu Netzendpendelungen,  
die zum Einschwingen der gemessenen Impedanz in den  
Auslösebereich führen können. Hierbei soll eine Auslösung  
verhindert werden. Die in der Erfindung beschriebene  
Einrichtung benutzt nun dieselben gemessenen Strom- und  
Spannungssignale, die zur Berechnung der Impedanz heran-  
gezogen werden, und bestimmt die Wirk- und Blindleistung.  
Aus diesen lässt sich nun ein Signal ableiten, das die Existenz  
von Pendelungen anzeigen und deshalb geeignet ist, die  
unerwünschte Auslösung der Distanzschutzeinrichtung zu  
verhindern. Zwei Bestimmungsgleichungen der Ableitung  
des Signals werden angegeben. Dabei wird ein Blockierkom-  
mando gesetzt, wenn die berechnete Signalfunktion einen  
Grenzwert überschreitet. Zudem ist das Vorzeichen der  
Signalfunktion von der Richtung des Leistungsflusses ab-  
hängig. Zur Deduktion desselben aus der gemessenen  
Impedanz werden ebenfalls zwei Verfahren angegeben, die  
ein Vorzeichen für den Leistungsfluß liefern und das Vorzei-  
chen der Signalfunktion korrigieren.



DE 41 00 646 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Erkennen von Leistungspendelungen und zum Schutz- von Distanzschutzeinrichtungen vor unerwünschter Auslösung während Leistungspendelungen.

5 Die Erfindung bezweckt die Verbesserung der Zuverlässigkeit von elektrischen Energieversorgungsnetzen durch den Schutz von Distanzschutzeinrichtungen gegen unnötige Abschaltung während Netzpendelungen.

## Die Bedeutung von Pendelsperren in elektrischen Versorgungsnetzen

10 Jede Störung in einem Übertragungsnetz ist mit Netzpendelungen verbunden. Verursacht durch die Netzschwierigkeiten kann die von Schutzeinrichtungen gemessene Impedanz die Auslösegrenze überschreiten und zu unerwünschten Auslösungen in Netzbezirken führen, die nicht von einem Fehler betroffen sind. Deshalb ist es für den Distanzschutz wichtig, während der transienten Pendelungen nicht auszulösen und es dem System zu ermöglichen, nach der Fehlerklärung stabil weiterzuarbeiten. Zu diesem Zweck sollten die Distanzschutzeinrichtungen für stark ausgelastete Leitungen mit einer Hilfseinrichtung ausgestattet sein, die Netzpendelungen erkennt und die Auslösefunktionen des Hauptleitungsschutzes unterbindet.

## Gegenwärtiger Stand der Lösungen

20 Es gibt zwei völlig unterschiedliche Verfahren, Schutzeinrichtungen gegen unnötiges Abschalten bei Leistungspendelungen zu schützen.

Die erste Methode wird als "Freigabe-Prinzip" bezeichnet (E.M Snierson: "Distanzschutz", in Engergoizdat, 1986, in Russisch). Die Distanzschutzeinrichtung ist im Normalbetrieb blockiert und nicht in der Lage, bei einem Fehler selbstständig zu reagieren.

25 Wenn ein Fehler auftritt, überprüft die Freigabe-Hilfseinrichtung auf schnelle Änderung der elektrischen Werte und läßt den Distanzschutz arbeiten, wenn die entsprechenden Bedingungen gegeben sind.

Das Freigabe-Prinzip wird ungern von den Elektrizitätsversorgungsunternehmen eingesetzt, da es folgende Nachteile besitzt:

30 1. Es reduziert die Zuverlässigkeit des Distanzschutzes, da die einwandfreie Funktion der Distanzschutzeinrichtung von der zuverlässigen Arbeit der Freigabe-Einrichtung abhängt.  
 2. Die Freigabe-Einrichtung verzögert die Abschaltung im Fehlerfall, da der Distanzschutz auf das Freigabe-Kommando warten muß.  
 3. Im übrigen kann die Freigabe-Einrichtung bei angehobener Empfindlichkeit bei Folgefehlern zu Fehlverhalten führen.  
 35 4. Schließlich kann es zu Fehlschaltungen kommen, wenn der sehr wahrscheinliche Fall auftritt, daß der Fehler auf beiden Seiten der Leitungen mit unterschiedlichen Zeiten geklärt wird.

Die zweite Methode wird als "Blockier-Prinzip" bezeichnet (H. Neugebauer: Selektivschutz, Springer Verlag, 1958). (A.R. van C. Warrington: Protective Relays. Their theory and practice, John Wiley and Sons, London, 1977). Hier ist die Distanzschutzeinrichtung stets freigegeben, um auf Fehler zu reagieren. Die Netzpendelungen werden von einer Hilfseinrichtung erkannt. Diese Hilfseinrichtung beobachtet die relativ langsam Änderungen der elektrischen Größen und blockiert die Distanzschutzeinrichtung gegen unnötiges Abschalten.

45 Die einfachste und älteste Methode zur Realisierung des Blockierprinzips ist der Einsatz des Unterimpedanz-Pendelsperre. Dieses hat eine Charakteristik, die sich der Anregekennlinie der Distanzschutzeinrichtung anpaßt. Das Blockiersignal wird erzeugt, wenn die Zeitverzögerung zwischen Erreichen der Blockierzone und Erreichen der Anregezone größer als eine vorgegebene Grenze ist. Im Falle eines Systemfehlers arbeiten Blockeinrichtungen und Distanzeinrichtung gleich schnell, so daß ein Blockiersignal nicht erzeugt wird. Während der Leistungspendelungen besteht eine Zeitverzögerung zwischen beiden Anregungen, und ein Blockiersignal wird erzeugt. 50 Die Unterimpedanzblockierungen wurden für unterschiedliche Distanzschutzeinrichtungen eingesetzt:

55 1. Verschobene mhO-Charakteristik (Pendelsperr-Zusatz-Relais, Elektromechanischer TYP YZ/L 3 BBC Information AK 427273, Februar 1970), (Out-of-step Impedance Blocking Relay with After-Effect Type Yi/L for use with Distance Relays type L3WyaS, BBC Relays and Protection Schemes, Information 62 – 123).  
 2. Doppelt quadratische Charakteristik (ABB Relays, Type RELZ 100, A full scheme phase and ground distance relay for transmission lines and cables, BO3 – 7019, March 1989).  
 3. Doppelte Rhombus-Charakteristik (ABB Relays, Type REZ 1, A full scheme phase and ground distance relay for transmission lines and cables BO37018, March 1987), (Out-of-step Protection Supplement, Siemens Druckschrift 7 SL 32).  
 60 4. Doppelte ovale Charakteristik (Power-swing-blocking relay type RANZP, ASEA Information BO3-7111E, May 1983), (ASEA Programmable Distance Relay Type RAZOA, Information RK 614-300 E, March 1979).

Die Unterimpedanz-Blockiereinrichtungen haben die folgenden Nachteile:

65 1. Um auch schnellen Netzpendelungen zu genügen, muß der Einstellbereich der Blockiereinrichtung möglichst weit ausgedehnt werden, so daß er sich mit dem Lastbereich überschneiden kann. Normalerweise liegt der Bereich der Blockiereinrichtung bei 130% des Bereichs der Anregung (GEC-Application Guide

"Protective Relays" Third Edition, 1987). Bei stark belasteten Leitungen ist normalerweise in der Impedanzebene der Abstand zwischen Normalbetrieb und Anregung nicht groß. In solchen Fällen kann die Blockiereinrichtung nicht zwischen Fehler und Pendelungen unterscheiden.

2. Für Netze mit geringer transienter Stabilität können die Lastbedingungen während eines Fehlers so stark schwanken, daß für den Betrieb nach dem Fehler die Impedanz weder die Blockiercharakteristik noch den Anregebereich verläßt. In einem solchen Fall besteht kein Zeitunterschied zwischen Anregung und Blockiersignal. Deshalb kann das Blockerkommando nicht abgesetzt werden, die Blockiereinrichtung ist unbrauchbar.

Um diese Nachteile der Unterimpedanzanregung zu umgehen, wurde vorgeschlagen, die Netzpendelungen durch das elektrische Signal  $|U| \cos\phi$  zu erkennen (F. Illar: Innovations in the Detection of Power Swings in Electrical Networks, Brown Boveri Review, No. 68, 1981).

Diese Größe wird zweimalig je Netzperiode gemessen als Spannungswert in dem Augenblick, in dem der Strom sein Maximum erreicht (EP-B-00 57 948). Blockiereinrichtungen, die auf dieser Größe basieren, benutzen die Ableitung  $d(|U| \cos\phi)/dt$  als Blockiersignal (Power Swing Blocking Relais Types UP 91, UP 92, LU 91, BBC Protection 66 – 51, U<sub>11E</sub>).

Ein wesentliches Merkmal dieser Größe ist, daß die zeitliche Ableitung  $d(|U| \cos\phi)/dt = \beta(d\delta/dt)$  proportional zum Rotorschlupf ( $d\delta/dt$ ) und dem Koeffizienten  $\beta = d(|U| \cos\phi)/d\delta$  ist, welche eine kontinuierliche Funktion des Polradwinkels  $\delta$  mit einem Extremwert bei  $\delta = 180^\circ$  darstellt. Diese Eigenschaft macht das Blockiersignal  $d(|U| \cos\phi)/dt$  sehr empfindlich auf Leistungspendelungen und erlaubt die Annahme, daß ein Blockerkommando erzeugt werden kann, wenn das Blockiersignal einen gewissen Grenzwert für einen festgelegten Zeitbereich überschreitet. Ein Nachteil dieses Signals ist, daß das Vorzeichen der Größe  $|U| \cos\phi$  von der Richtung des Leistungsflusses während der transienten Pendelungen abhängt. Aus dieser Tatsache folgt, daß die Blockiersignale  $d(|U| \cos\phi)/dt$  am empfangenden und sendenden Ende der Leitung unterschiedliche Vorzeichen haben. Ein gegebener Meßpunkt des Schutzes kann abhängig von Fehlerort und Art der Fehlerklärung während des transienten Ausgleichsvorgangs sendend oder empfangend sein. Deshalb wird eine Blockiereinrichtung, die für die sendende Seite konzipiert ist, für die empfangende Seite falsch arbeiten.

Um Leistungspendelungen für beide Leitungsseiten zu erkennen, ist es notwendig, dieses Signal durch  $|U| \cos\phi$  zu ersetzen. Jedoch verschlechtert diese Modifikation beträchtlich die sonst guten Eigenschaften des Blockiersignals. Mit dieser Modifikation ist der Koeffizient  $\beta = |d|U| \cos\phi|/d\phi$  keine kontinuierliche Funktion des Winkels mehr und ändert sein Vorzeichen bei  $\beta = 180^\circ$ . Somit ändert das Blockiersignal  $\beta$  sein Vorzeichen, wenn die Impedanzortskurve die imaginäre X-Achse schneidet. Eine Einrichtung, die auf diesem Signal basiert, erkennt gut den Beginn von Leistungspendelungen.

Wegen des oben erwähnten Vorzeichenwechsels wird das Signal jedoch während der besonders kritischen Phase beim Winkel  $\delta = 180^\circ$  unterbrochen. (Dies ist sehr ungünstig). Später entstehen wieder große Werte in dem weiten Bereich kleiner Winkel. Das unterbrochene Blockiersignal kann kaum von einem Hilfsrelais aufrechterhalten werden, solange die Impedanz im Anregebereich bleibt. Die Tatsache, daß das Blockiersignal für kleine Winkel erneut erscheint, ist eine negative Begleiterscheinung, die durch die Verwendung des Signals  $|U| \cos\phi$  anstelle von  $|U| \cos\phi$  verursacht wird.

Für kleine Polradwinkel erzeugt die Meßeinheit unnötigerweise ein Blockiersignal, so daß die Distanzschutzeinrichtung zusammen mit der Blockiereinrichtung nicht vollständig bereit ist, nun auf einen neuen Fehler zu reagieren, der möglicherweise während der Leistungspendelungen auftritt. Solch ein unerwünschtes "Vor-Fehler"-Blockiersignal zusammen mit einem Signal aus der Anregung kann ein Blockerkommando erzeugen, so daß der Schutz nicht auslöst.

Der im Anspruch 1 angegebenen Erfahrung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Erkennen von Leistungspendelungen und zum Schutz von Distanzschutzeinrichtungen vor unerwünschter Auslösung während der Leistungspendelungen zu entwickeln, mit dem ein Signal als Bedingung für die Blockierung erzeugt wird, das ein für das sendende und empfangende Ende einer Leitung charakteristisches Vorzeichen besitzt und dessen Wert nur dann signifikant ist, wenn die gemessene Impedanz in den Auslösbereich des Distanzschutzes eintritt.

Die Aufgabe wird für das Verfahren erfundengemäß durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst. Mit den im Anspruch 1 angegebenen Maßnahmen wird der gegenwärtige Stand der Pendelsperr-Technik wesentlich verbessert. Das Blockiersignal zeigt eindeutig an, ob am Meßort ein Sende- oder Empfangszustand vorhanden ist, wenn eine Leistungspendelung einer vorgebbaren Größe erfaßt wird. Das Blockiersignal kann hinsichtlich des Betrages auf zweifache Art gewonnen werden. Im allgemeinen reicht für den Schutz die Erzeugung eines Blockierbedingungssignals aus. Wenn Redundanz gewünscht wird, können beide Blockierbedingungssignale erzeugt werden. Wegen der teilweise unterschiedlichen Herleitung können dabei bestimmte Arten von Fehlern sowohl in der Hard- als auch in der Software vermieden werden.

Das jeweilige Blockiersignal berücksichtigt die Richtung der transienten Leistungspendelungen und tritt mit signifikanten Werten nur in Erscheinung, wenn für große Polradwinkel die Impedanz in den Auslösbereich der Distanzschutzeinrichtung eintreten kann. Für kleine Winkel verschwindet das Signal oder hat einen Wert, dessen Vorzeichen entgegengesetzt zu denen des Grenzwertes ist. Während der Netzpendelungen sind Distanzschutzeinrichtung und Blockiereinrichtung für einen weiten Bereich kleiner Winkel bereit, einwandfrei auf eventuelle Fehler im Netz zu reagieren.

Ein weiterer Nachteil der Pendelsperren, die das Signal  $|U| \cos\phi$  verwenden, ergibt sich aus der möglichen Stromwandlersättigung während eines Fehlers mit grossem Gleichstromanteil. Zum Zeitpunkt des Fehlers reagiert die Pendelsperre nicht, weil nur ein einziger Signalsprung auftritt (F. Illar: Innovations in the Detection of Power Swings in Electrical Networks, Brown Boveri Review, No. 68, 1981).

Wenn dagegen die Gleichstrom-Komponente langsam abklingt, verläßt der Spannungswandler den Sätti-



gungsbereich und gleichzeitig nimmt das Signal  $|U| \cos\phi$  genau wie bei einer Leistungspendelung ab. Deshalb kann eine unnötige Sperre des Distanzschutzes bei Fehlern mit Stromwandlersättigung auftreten. Besonders in der zweiten Stufe des Distanzschutzes ist also Fehlfunktion möglich. In Anspruch 7 wird eine Methode angegeben, die Pendelsperre während auftretender Stromwandlersättigung gegen Fehlfunktion zu schützen. Das Blockiersignal wird unterbrochen, indem das Vorzeichen der Richtung der Leistungspendelungen zu Null gesetzt wird, wenn der Fehlerstrom eine zweite Harmonische mit großer Amplitude enthält.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Ansprüchen 2 bis 6 beschrieben. Anordnungen zur Durchführung der in den Ansprüchen 1 bis 6 beschriebenen Maßnahmen weisen erfundungsgemäß die Merkmale der Ansprüche 7 oder 8 auf. Die Erfindung wird im folgenden anhand eines in einer Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiels näher beschrieben, aus dem sich weitere Einzelheiten, Merkmale und Vorteile ergeben.

Es zeigen:

**Fig. 1a** ein Schaltbild einer zwischen Sammelschienen verlaufenden elektrischen Übertragungsleitung mit verschiedenen Reaktanzverhältnissen der beiderseits eines Meßorts angeordneten Leitungsabschnitte,

**Fig. 1b** ein Diagramm eines ersten leistungsorientierten Blockiersignals als Funktion des Polradwinkels in einem kartesischen Koordinatensystem für die Anordnung gem. **Fig. 1**,

**Fig. 2a** ein Schaltbild einer zwischen Sammelschienen verlaufenden elektrischen Übertragungsleitung mit verschiedenen Spannungsverhältnissen an den Enden der beiderseits des Meßorts angeordneten Leitungsabschnitte,

**Fig. 2b** ein Diagramm eines zweiten leistungsorientierten Blockiersignals als Funktion des Polradwinkels in einem Kartesischen Koordinatensystem für die Anordnung gem. **Fig. 2**,

**Fig. 3** ein Schaltbild einer zwischen zwei Abzweigen angeordneten Übertragungsleitung zur Darstellung des Richtungsproblems für eine Mehrmaschinenanordnung,

**Fig. 4a** ein Schaltbild einer Übertragungsleitung mit Fehlern an verschiedenen Stellen,

**Fig. 4b** bis **e** Diagramme typischer Reaktanzkreise mit der Rotationsrichtung während eines asynchronen Zustands,

**Fig. 5** einen Impedanzkreis in Polarkoordinaten,

**Fig. 6a** ein Schaltbild einer Parallelleitung mit einem Fehler,

**Fig. 6b, c** Diagramme des Blockiersignals und des Impedanzkreises für asynchrone Lastpendelungen,

**Fig. 6d, e** ein Diagramm des Blockiersignals und des Impedanzkreises für synchrone Lastpendelungen,

**Fig. 7** ein Strukturbild einer Blockiereinrichtung nach dem ersten leistungsorientierten Blockiersignal,

**Fig. 8** ein Strukturbild einer Blockiereinrichtung nach dem zweiten leistungsorientierten Blockiersignal.

Eine Übertragungsleitung weist zwei von einem Abzweig 1 ausgehende Leistungsabschnitte 2, 3 auf, die an Abzweigen 4, 5 enden, die von nicht näher bezeichneten Generatoren gespeist werden. Am Abzweig 1 befindet sich ein Meßort und Distanzschutzeinrichtungen 6, 7. Die Generatoren weisen die Spannungen  $E_a$  und  $E_b$  auf.

Beiderseits des Abzweigs sind die Impedanzen  $X_a$  und  $X_b$  vorhanden. Es gelten die Beziehungen:

$$K_E = \frac{E_a}{E_b} \text{ und } K_X = \frac{X_a}{X_b}$$

40

#### Erzeugung der leistungsorientierten Blocksigale

Ein erstes leistungsorientiertes Blocksignal ist wie folgt definiert:

45

$$\text{Signal} = \frac{\frac{\Delta Q - \Delta P}{S} \times \text{sign}}{\Delta t}$$

50 Hierbei sind  $\Delta P$  und  $\Delta Q$  die Änderungen der Wirk- und Blindleistung während des Zeitintervalls  $\Delta t$ ,  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$  ist der Betrag der Scheinleistung und  $\text{sign} = \pm$  ist eine Variable, die von der Richtung des transienten Leistungsanteils abhängt.

Um zu zeigen, wie das obige Signal in der Lage ist, Leistungspendelungen zu erkennen, soll die Formel etwas umgeschrieben werden:

55

$$\text{Signal} = \beta \frac{d\delta}{dt} \text{ mit } = \frac{\partial(Q-P)}{\partial\delta} \times \frac{\text{sign}}{s}$$

60 Hierbei ist der Koeffizient  $\beta$  eine Funktion des Polradwinkels  $\delta$ , wie in **Fig. 6** im Kartesischen Koordinatensystem dargestellt. Die **Fig. 1b** zeigt den Koeffizienten  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  und  $\beta_3$  für die drei Werte  $K_X = 0,25$ ,  $K_X = 0,5$  und  $K_X = 4$ . Für kleine Winkel in der Umgebung von  $0^\circ$  und  $360^\circ$  ist der Koeffizient  $\beta$  negativ und steigt an, wenn der Polradwinkel anwächst. Für große Winkel ist der Term  $\beta$  positiv und erreicht sein Maximum in der Umgebung von  $\delta = 180^\circ$ .

65 Die Tatsache, daß in einer großen Umgebung des kritischen Winkels  $\delta = 180^\circ$  der Koeffizient  $\beta$  einen großen Wert hat, stellt den großen Vorzug des obigen Signals dar und macht es als Kriterium für die Erkennung von Leistungspendelungen geeignet.

Ein zweites leistungsorientiertes Blockiersignal ist auf folgende Weise definiert:

$$\text{Signal} = \frac{-(\Delta P/S_t)\text{sign}}{\Delta t}$$

Hierbei ist  $\Delta P$  die Wirkleistungsänderung am Messort des Schutzes,  $\Delta t$  ist das Zeitintervall und  $S_t = U_n |I|$  ist der absolute Betrag der Leistung, gebildet aus der Nennspannung und der Stromamplitude. Die Variable  $\text{sign} = \pm 1$  hängt von der Richtung der transienten Leistungspendelung ab.

Um die Abhängigkeit des obigen Signals von dem Polradwinkel zu zeigen, ist es sinnvoll, die Beschreibungs-gleichung umzuformen:

$$\text{Signal} = \beta \frac{d\delta}{dt} \quad \text{mit } \beta = \frac{\partial}{\partial \delta} \left[ \frac{P}{S_t} (-\text{sign}) \right].$$

Hierbei ist der Koeffizient  $\beta$  eine kontinuierliche Funktion des Polradwinkels  $\delta$ , wie in Fig. 2 gezeigt wird. Die Fig. 2b zeigt für die drei Werte  $K_E = 1.5; 1.2$  und  $0.8$  drei Koeffizienten  $\beta_1, \beta_2$  und  $\beta_3$ . Für kleine Winkel in der Umgebung von  $0^\circ$  und  $360^\circ$  ist der Term positiv und erreicht sein Maximum bei  $\delta = 180^\circ$ . Die Tatsache, daß für einen weiten Bereich in der Umgebung von  $\delta = 180^\circ$  der Term  $\beta$  einen großen Wert hat, macht das obige Signal geeignet, Leistungspendelungen zu erkennen.

Die Blockiereinrichtung basiert auf dem ersten oder zweiten Blockiersignal und erzeugt ein Blockierkommando, wenn die Impedanz innerhalb der Anregezone liegt und gleichzeitig das Blockiersignal einen vorgegebenen Grenzwert überschreitet.

#### Erkennung der Richtung von Leistungspendelungen

Die Koeffizienten  $\beta$  in beiden obigen Blockiersignalen sind positiv für große Polradwinkel, wenn die Variable "sign" die Richtung der Leistungspendelungen richtig erkennt. Während eines transienten Ausgleichsvorgangs in einem Mehrmaschinensystem kann ein vorgegebener Schutzmeßort – abhängig von Fehlerort und Art der Fehlerklärung – zu einem Sende- oder Empfangsort werden. Dies ist in Fig. 3 dargestellt. Eine Blockiereinrichtung, die in einer Leitung L1 in Punkt A installiert ist, beobachtet, abhängig vom Fehlerort, Leistungspendelungen in zwei Richtungen. Wenn bei einem Fehler F1 ein mit dem Punkt A verbundener Generator G1 asynchron wird, beobachtet der Schutz A in Leitung L1 einen großen Leistungsfluß in Vorwärtsrichtung. Wenn bei einem Fehler F2 ein mit einem Punkt B verbundener Generator G2 asynchron läuft, beobachtet der gleiche Schutz einen Leistungsfluß in Rückwärtsrichtung.

Das Verfahren zur Erkennung der transienten Leistungspendelungen ermittelt die Bewegungsrichtung der Impedanz in der komplexen R-X-Ebene. Während des asynchronen Laufes beschreibt die Impedanz einen Kreis mit dem Radius  $p_l$  und einem Mittelpunkt auf der X-Achse mit dem Abstand  $b$  zur R-Achse. Beide Parameter  $p$  und  $b$  hängen von den Reaktanzen  $X_a, X_b$  sowie den Koeffizienten  $k_x = X_a/X^b$  und  $k_E = E_a/E_b$  ab. Typische Anordnungen für solche Kreise sind in Fig. 4b bis e gezeigt.

Für den Fall eines Netzes wie in Fig. 4a bildet der Einbauort 10 das sendende Ende und der Einbauort 12 das empfangende Ende der Leitung. Fig. 4b und Fig. 4d beziehen sich auf das sendende Ende und Fig. 4c und Fig. 4e beziehen sich auf das empfangende Ende.

Der Zeitpunkt, in dem die Impedanz die imaginäre Achse X schneidet, ist durch ein schwarzes Quadrat gekennzeichnet, wenn der Polradwinkel  $\delta = 180^\circ$  beträgt und mit einem schwarzen Punkt, wenn der Polradwinkel  $\delta = 0^\circ$  oder  $\delta = 360^\circ$  beträgt. Wie aus Fig. 4 ersichtlich ist und auch mathematisch nachgewiesen werden kann, bewegt sich am sendenden Enden bei  $\delta = 180^\circ$  für alle Koeffizienten  $k_x$  und  $k_E$  die Impedanz in der komplexen Ebene von rechts nach links. Für den gleichen Polradwinkel  $\delta = 180^\circ$ , jedoch am empfangenden Ende der Leitung, bewegt sich die Impedanz in entgegengesetzter Richtung.

Dies läßt den Schluß zu, daß für große Polradwinkel in der Umgebung =  $180^\circ$  das Vorzeichen der Impedanz-rotation durch folgenden einfachen Rechenablauf ermittelt werden kann:

$$\text{sign} = \begin{cases} +1 & \text{wenn } \frac{dR}{dt} < 0 \text{ oder } \Delta R < 0 \\ -1 & \text{wenn } \frac{dR}{dt} > 0 \text{ oder } \Delta R > 0. \end{cases} \quad (\text{A1})$$

Die Impedanzortskurve hat in der Umgebung von kleinen Polradwinkeln  $\delta = 0^\circ$  und bei  $\delta = 360^\circ$  einen entgegengesetzten Durchlaufsinn als in der Umgebung von  $\delta = 180^\circ$ .

Ein Algorithmus, der das Vorzeichen der Impedanzrotation für große und kleine Polradwinkel erkennt, ist umfangreicher und erfordert die Bestimmung des Kreismittelpunktes  $b$  in seiner Lage gegenüber der R-Achse. Aus Fig. 5 läßt sich leicht folgende Gleichung ableiten:

$$b = X(t) + R(t) \frac{dR/dt}{dX/dt} = X(t) + R(t) \frac{dR}{dX} = X(t) + R(t) \frac{\Delta R}{\Delta X} \approx X(t) + R(t) \frac{\Delta R}{\Delta X}$$

Gem. Fig. 5 gilt für Resistenz  $R(t) = \rho \cdot \cos \varphi$  und für die Reaktanz  $X(t) = \rho \sin \varphi + b$ , wobei mit  $\rho$  die Impedanz und mit  $\delta$  der Winkel zwischen Reaktanz und Impedanz bezeichnet ist. Der Mittelpunkt  $b$  kann von den gemessenen Werten  $R$  und  $X$  sowie deren Änderung  $\Delta R$ ,  $\Delta X$  berechnet werden. Aus Bild 4 lässt sich dann folgender Algorithmus ableiten:

$$5 \quad \text{sign} = \begin{cases} +1 & \text{wenn } \left\{ (\Delta R < 0) \wedge [((b > 0) \wedge (X < b)) \vee ((b < 0) \wedge (X > b))] \right\} \\ & \vee \left\{ (\Delta R > 0) \wedge [((b > 0) \wedge (X > b)) \vee ((b < 0) \wedge (X < b))] \right\} \\ -1 & \text{in allen anderen Fällen.} \end{cases} \quad (A2)$$

15 Beim Einsatz digitaler Technik ist die Realisierung der Blockiereinrichtung durch Programmierung sehr einfach.

Der Algorithmus (A2) ist allgemeiner gehalten, aber aufwendiger. Um eine korrekte Funktion der Pendelsperre sicherzustellen, ist es ausreichend, das Signal nur innerhalb der Anregungszone zu betrachten. Für eine solche Anwendung kann der einfachere Algorithmus (A1) verwendet werden.

#### 20 Simulationsergebnisse

Bild 6a zeigt das Verhalten des obigen Algorithmus (A2) für den Fall, daß der Fehler auf einer Leitung L1 in der Nähe einer Sammelschiene  $w_1$  auftritt. Zu der Leitung L1 ist eine Leitung L2 parallel geschaltet, die wie die Leitung L1 zwischen der Sammelschiene  $w_1$  und einer zweiten Sammelschiene  $w_2$  angeordnet ist. Nach der Fehlerklärung speist der Generator nur noch über Leitung L2. Der Einbauort  $w_2$  des Netzschatzes dieser Leitung ist dann das empfangende Ende.

Fig. 6b und Fig. 6c zeigen den Fall des asynchronen Betriebes. In diesem Fall erkennt der Algorithmus (A2), daß die in Fig. 6 gezeigte Impedanzortskurve unter der R-Achse liegt und im Uhrzeigersinn durchlaufen wird. In Übereinstimmung mit der oben angegebenen Regel ist das Rotationsvorzeichen negativ, und der Algorithmus bestimmt  $\text{sign} = -1$ . Die Fig. 6c zeigt die Rotation der Impedanzortskurve und den ermittelten Radius für einige ausgewählte Punkte. Jeder Radius ist als Linie gekennzeichnet, die vom Kreisumfang zur vertikalen Achse führt (Punkte 1, 2, 3, 4, 5).

In Fig. 6b ist das zweite leistungsorientierte Blockiersignal ohne und mit Modifikation und das Vorzeichensignal als punktierte bzw. ausgezogene Kurve dargestellt. Das modifizierte Signal überschreitet den Grenzwert, wenn die Impedanz in dem Auslösebereich der Distanzschutzeinrichtung liegt. Außerhalb des Anregungsbereiches (Punkte 2, 3, 4) ist das Blockierbedingungssignal negativ und überschreitet nicht den positiven Grenzwert.

Bei schwachen synchronen Netzpendelungen (Fig. 6d und Fig. 6e) wechselt der Algorithmus zweimal das Vorzeichen während der betrachteten Periode. Nach der Fehlerklärung (Punkt P, Fig. 6e) erkennt der Algorithmus  $\text{sign} = -1$  wie vorher bei den asynchronen Leistungspendelungen. Später im Umkehrpunkt der Impedanztrajektorie (Punkt 2, Fig. 6e) wechselt das Vorzeichen auf  $\text{sign} = +1$ , da die Impedanzortskurve entgegen dem Uhrzeigersinn durchlaufen wird. In Fig. 5d erscheint der Umkehrpunkt (Punkt 4) als Strang des Signals von einem negativen zu einem positiven Wert. In dem nächsten Umkehrpunkt (Punkt 8) wechselt die Situation erneut. Die Impedanzortskurve wird im Uhrzeigersinn durchlaufen, und das Vorzeichen ist auf positiv gewechselt. In Fig. 6d erfolgt dieser Wechsel zwischen den Punkten 8 und 9 durch einen Sprung vom positiven auf den negativen Wert.

Wie die Fig. 6b bis 6e für asynchrone und synchrone Pendelungen zeigen, ist eine einwandfreie Erkennung möglich, wenn die Impedanz die Schutzwelle überschreitet.

#### 50 Beispiele für Blockiereinrichtungen

Strukturbilder für Blockiereinrichtungen, die nach dem ersten und zweiten leistungsorientierten Blockierbedingungssignal arbeiten, sind in den Fig. 7 und 8 dargestellt.

Spannung und Strom werden mit der Frequenz 600 Hz abgetastet. Jedes Signal wird dann durch zwei orthogonale digitale Filter 20, 21, 22, 23 geleitet.

Um die zur Signalfilterung benötigten Berechnungen zu vereinfachen, werden die Sinus- und Kosinusfunktionen, die das Filterfenster bilden, durch Stufenfunktionen angenähert. Diese beiden Filter werden durch folgende Gleichungen beschrieben:

$$60 \quad i_{s0} = \frac{1}{6,2438} \left[ \frac{1}{4} (i_0 + i_5 - i_6 - i_{11}) + \frac{3}{4} (i_1 + i_4 - i_7 - i_{10}) + (i_2 - i_3 - i_8 - i_9) \right]$$

$$65 \quad i_{c0} = \frac{1}{5,2438} \left[ (-i_0 + i_5 + i_6 - i_{11}) + \frac{3}{4} (-i_1 + i_4 + i_7 - i_{10}) + \frac{1}{4} (-i_2 + i_3 + i_8 - i_9) \right]$$

Dabei sind  $i_{s0}$ ,  $i_{c0}$  die Sinus- bzw. Cosinuskomponente und  $i_0, i_1, i_2 \dots i_{11}$  der aktuelle und die vorherigen

Abtastwerte. Die gleichen Formeln gelten für die Spannungen.

Nun sind Wirk- und Blindleistung durch Multiplikation der entsprechenden orthogonalen Komponenten von Strom und Spannung sowie das Quadrat der Stromamplitude in einer Anordnung 25 und 27 zu berechnen:

$$P = \frac{1}{2} (u_{s0} i_{s0} + u_{c0} i_{c0}) \quad 5$$

$$Q = \frac{1}{2} (u_{c0} i_{s0} - u_{s0} i_{c0}) \quad 10$$

$$I^2_m = i_{s0}^2 + i_{c0}^2$$

Die zu bestimmenden Widerstände und Reaktanzen werden in einem Baustein 31 aus den elektrischen Leistungen und dem Quadrat der Stromamplitude berechnet. 15

$$R = \frac{2P}{I^2_m} \text{ und } X = \frac{2Q}{I^2_m}$$

In beiden Fällen (Fig. 7 und Fig. 8) werden die beiden Widerstandswerte einem Tiefpaßfilter 34, 35 zugeführt, um hochfrequente Schwingungen zu dämpfen, die den Blockieralgorithmus und den Algorithmus zur Erkennung der Durchlaufrichtung der Impedanzortskurve stören könnten. 20

Diese Tiefpaßfilter werden durch folgende Gleichung beschrieben:

$$y_0 = \frac{1}{12} (X_0 + X_1 + \dots + X_{11}) \quad 25$$

Dabei ist  $y_0$  das Ausgangssignal des Filters.

In beiden Pendelsperren wird das Blockiersignal durch numerische Differentiation der in einem Baustein 29 berechneten relevanten Leistungsbezogenen Signale gebildet. Dabei ist das Zeitintervall gleich der Periodendauer  $T = 0,020$  s. Es gilt die Gleichung: 30

$$y_0 = \frac{X_0 - X_{12}}{\Delta T} \quad 35$$

Ein Differenzierer 33 mit diesem Zeitintervall eliminiert alle geraden und ungeraden Harmonischen aus dem Ausgangssignal. Daher ist ein Tiefpaßfilter zur Glättung nicht notwendig. 40

Um die Rechnungen zu beschleunigen, werden folgende Quadratwurzelfunktionen, die zur Berechnung der Stromamplitude (Fig. 7 und Fig. 8) in einem Baustein 26 und der Scheinleistung (Fig. 7) in einem Baustein 30 notwendig sind, durch eine lineare Approximation in den vier Quadranten angenähert:

$$I_m = \sqrt{i_{s0}^2 + i_{c0}^2} \quad 45$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Die geglätteten Meßwerte von Widerstand und Reaktanz werden zur Ermittlung des korrekten Vorzeichens der Richtung der Leistungspendelungen nach Algorithmus (A1) in einer Anordnung 37 eingesetzt. Das Blockiersignal mit dem ermittelten Vorzeichen wird in einer Anordnung 38 mit bestimmten Schwellwerten verglichen. 50

Wird dieser Schwellwert überschritten und liegen sowohl ein Anregesignal des Distanzschutzes als auch keine Nullsystemströme ( $3I_0$ ) am Meßort des Distanzschutzes vor, so wird ein Blockierkommando generiert. Dieses Blockierkommando liegt höchstens solange an, wie es ein Timer vorgibt. 55

Um die Pendelsperre gegen Fehlfunktion während Stromwandlersättigung zu schützen, wird ein Unterbrecher (Anordnung 32) eingesetzt, der das Vorzeichen zu Null setzt, falls die Amplitude der zweiten Harmonischen des Stromes so groß gegenüber der Amplitude der ersten Harmonischen ist. Die Amplitude der zweiten Harmonischen wird in einem Baustein 28 aus zwei orthogonalen Signalen gewonnen, die Bandpaßfiltern 24 mit folgender Charakteristik entnommen werden: 60

$$i_{s0} (100) = \frac{1}{6} \left[ \frac{1}{2} (-i_0 - i_2 + i_3 + i_5 - i_6 - i_8 + i_9 + i_{11}) - i_1 + i_4 + i_7 + i_{10} \right]$$

$$i_{c0} (100) = \frac{1}{6,9282} [i_0 - i_2 - i_3 + i_5 + i_6 - i_8 - i_9 + i_{11}], \quad 65$$

worin  $i_{s0}$  und  $i_{c0}$  die Sinus- und Cosinuskomponente der 2. Harmonischen und  $i_0, i_1$  die aktuellen und vorherigen Abtastwerte sind.

Fig. 7 und Fig. 8 sollen den Signalfluß lediglich veranschaulichen. In der Praxis geschieht die Verarbeitung durch ein Mikrocomputerprogramm. Die Analoggrößen Spannung und Strom werden auf einen Bessel-Vorfilter gegeben, um die Harmonischen höherer Ordnung zu entfernen.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Erkennen von Leistungspendelungen und zum Schutz von Distanzschutzeinrichtungen vor unerwünschter Auslösung während Leistungspendelungen, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens ein Blockiersignal für die Distanzschutzeinrichtung durch zeitliche Ableitung einer leistungsbezogenen elektrischen Größe erzeugt wird, deren Vorzeichen, das von der Richtung der transienten Leistungspendelungen abhängt, aus der Durchlaufrichtung der Impedanzortskurve in der komplexen Ebene bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Blockiersignal als Ableitung der elektrischen Größe, die proportional der Differenz aus Blind- und Wirkleistung am Meßort ist, nach folgender Beziehung bestimmt wird:

$$\frac{\Delta Q - \Delta P}{S} \cdot \text{sign} \\ \frac{\Delta t}{\Delta t},$$

worin mit  $\Delta P$  und  $\Delta Q$  die Änderungen der Wirk- und Blindleistung, mit  $S$  der Betrag der Scheinleistung, mit  $\Delta t$  das Zeitintervall der Änderungen der Blind- und Wirkleistung und mit  $\text{sign} = \pm 1$  das Vorzeichen bezeichnet sind.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Blockiersignal als Ableitung der elektrischen Größe, die dem Quotienten aus Wirkleistung und Betrag der Scheinleistung am Meßort proportional ist, nach folgender Beziehung bestimmt wird:

$$-\frac{\Delta(P/St)}{\Delta t} \times \text{sign}$$

worin mit  $P$  die Wirkleistung, mit  $St$  der Betrag der Scheinleistung, mit  $\Delta t$  das Zeitintervall der Änderung des Quotienten und mit  $\text{sign} = \pm 1$  das Vorzeichen bezeichnet sind.

4. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Vorzeichen des Blockiersignals bestimmt wird aus der Beobachtung der Durchlaufrichtung der Impedanzortskurve in der komplexen Ebene, wobei die Durchlaufrichtung bestimmt wird aus der zeitlichen Ableitung oder der Änderung der gemessenen Resistanz oder Resistanz und Reaktanz.

5. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß am Meßort Ströme und Spannungen eines elektrischen Versorgungsnetzes mit einer Frequenz, die höher als die Netzfrequenz ist, abgetastet werden, daß aus den abgetasteten Strom- und Spannungswerten die Stromamplituden sowie die Wirk- und Blindleistung und die Resistanz und/oder Reaktanz bestimmt wird,

- 45 daß das Blockiersignal aus der Wirk- und Blindleistung und der Stromamplitude durch zeitliche Ableitung gebildet wird, daß die Richtung von transienten Leistungspendelungen aus der Durchlaufrichtung der Reaktanz und/oder Resistanz bestimmt wird und  
daß das Blockierkommando erzeugt wird, wenn das Blockiersignal, multipliziert mit dem Vorzeichen der Richtung der Leistungspendelungen, einen vorgegebenen Grenzwert überschreitet und gleichzeitig sowohl ein Anregesignal des Distanzschutzes vorliegt und keine Nullsystemströme vom Distanzschutz gemessen werden.

6. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Blockiersignal unterbrochen wird, wenn das Verhältnis der Amplitude der 2. Harmonischen des Stromes zur Amplitude der Grundschwingung einen vorgegebenen Grenzwert überschreitet.

- 55 7. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Unterbrechung des Blockiersignals, das die Richtung der Leistungspendelungen angebende Vorzeichen auf Null gesetzt wird ( $\text{sign} = 0$ ).

8. Anordnung zur Durchführung des Verfahrens nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß Strom- und Spannungswandler über Abtast- und Halteschaltungen mit einer diese steuernden Datenverarbeitungsanordnung verbunden sind, in der die Werte der gemessenen Ströme und Spannungen durch Bandpaßfilterung in Sinus- und Cosinuskomponenten zerlegt werden, aus denen die Wirk- und Blindleistung sowie der Strom und das Quadrat des Stroms bestimmt werden, wobei die Differenz der Blind- und Wirkleistung nach der Zeit differenziert und durch die Scheinleistung zur Erzeugung des Differentialquotienten des Blockiersignals dividiert wird und aus der Wirk- und Blindleistung und dem Quadrat des Stroms die Reaktanz und Resistanz bestimmt werden, aus der nach Tiefpaßfilterung das Vorzeichen des Blockiersignals erzeugt wird, und wobei das Blockiersignal mit einem Anregesignal aus einer Distanzschutzeinrichtung und mit einem Zeitverzögerungssignal zur Erzeugung eines die Distanzschutzeinrichtung sperrenden Blockierkommandos verknüpft wird und das Blockiersignal bei einem

vorgebbaren Schwellwert für die zweite Stromharmonische unterbrochen wird, um eine Fehlauslösung des Blockierkommandos bei Stromwandlersättigung zu vermeiden.

9. Anordnung zur Durchführung des Verfahrens nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß Strom- und Spannungswandler über Abtast- und Halteschaltungen mit einer diese steuernden Datenverarbeitungsanordnung verbunden sind, in der die Werte der gemessenen Ströme und Spannungen durch Bandpaßfilterung in Sinus- und Cosinuskomponenten zerlegt werden, aus denen der Strom, das Quadrat des Stroms, die Wirk- und Blindleistung und hieraus die Scheinleistung bestimmt werden, wobei aus dem Quotienten von Wirk- und Blindleistung und dem Strom der Differentialquotient des Blockiersignals und aus der Wirk- und Blindleistung und dem Quadrat des Stroms die Reaktanz und Resistenz bestimmt werden, aus der nach Tiefpaßfilterung das Vorzeichen des Blockiersignals erzeugt wird, und wobei das Blockiersignal mit einem Anregesignal aus einer Distanzschutzeinrichtung und mit einem Zeitverzögerungssignal zur Erzeugung eines die Distanzschutzeinrichtung sperrenden Blockierkommandos verknüpft wird und das Blockiersignal bei einem vorgebbaren Schwellwert für die zweite Stromharmonische unterbrochen wird, um eine Fehlauslösung des Blockierkommandos bei Stromwandlersättigung zu vermeiden.

10. Anordnung nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, daß aus den Werten der gemessenen Ströme durch Filterung die zweite Harmonische bestimmt wird, die mit einem vorgebbaren Grenzwert verglichen wird, bei dessen Überschreitung das Vorzeichen des Blockiersignals auf Null gesetzt wird.

11. Anordnung nach einem oder mehreren der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Bandpaßfilter für die Sinus- und Cosinusfunktion digitale Filter mit folgender Filtercharakteristik sind:

$$i_{s0} = \frac{1}{6,2438} \left[ \frac{1}{4} (i_0 - i_5 - i_6 - i_{11}) + \frac{3}{4} (i_1 + i_4 - i_7 - i_{10}) + (i_2 + i_3 - i_8 - i_9) \right]$$

$$i_{c0} = \frac{1}{5,2438} \left[ (-i_0 + i_5 + i_6 - i_{11}) + \frac{3}{4} (-i_1 + i_4 + i_7 - i_{10}) + \frac{1}{4} (-i_2 + i_3 + i_8 - i_9) \right]$$

$$u_{s0} = \frac{1}{6,2438} \left[ \frac{1}{4} (u_0 - u_5 - u_6 - u_{11}) + \frac{3}{4} (u_1 + u_4 - u_7 - u_{10}) + (u_2 + u_3 - u_8 - u_9) \right]$$

$$u_{c0} = \frac{1}{5,2438} \left[ (-u_0 + u_5 + u_6 - u_{11}) + \frac{3}{4} (-u_1 + u_4 + u_7 - u_{10}) + \frac{1}{4} (-u_2 + u_3 + u_8 - u_9) \right]$$

worin mit  $i_{s0}$ ,  $i_{c0}$  die Grundwellen der Stromsinus- und -cosinuskomponente, mit  $u_{s0}$ ,  $u_{c0}$  die Grundwellen der Spannungssinus- und -cosinuskomponente mit  $i_0$ ,  $i_1$ ,  $i_2$ ... $i_{11}$  der aktuelle und der vorherige Stromabtastwert und mit  $u_0$ ,  $u_1$ ,  $u_2$ ... $u_{11}$  der aktuelle und der vorherige Spannungsabtastwert bezeichnet sind.

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

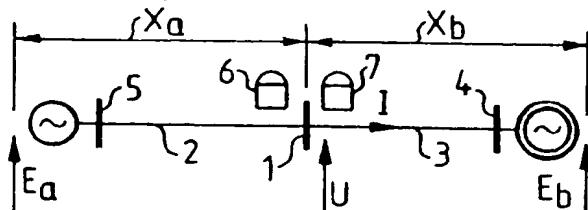
55

60

65

— Leerseite —

FIG.1a



$$\text{signal} = \frac{\Delta Q - \Delta P}{S} \cdot \text{sign}$$

$$\text{signal} = \beta \frac{d\delta}{dt}$$

$$\beta = \frac{\frac{\partial Q}{\partial \delta} - \frac{\partial P}{\partial \delta}}{S} \cdot \text{sign}$$

$$k_E = \frac{E_a}{E_b}, k_X = \frac{X_a}{X_b}$$

FIG.1b

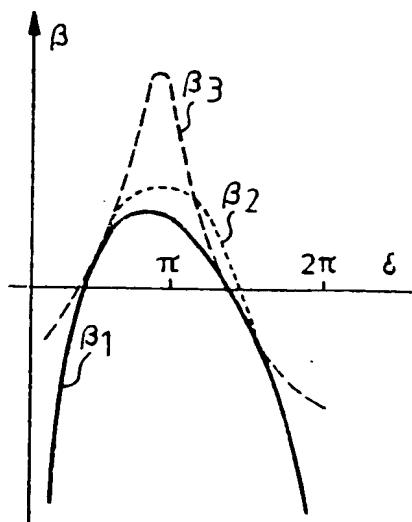
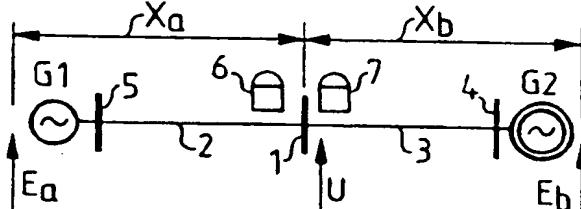


FIG.2a



$$\text{signal} = -\frac{\Delta P}{S_t} \cdot \text{sign}$$

$$\text{signal} = \beta \frac{d\delta}{dt}$$

$$\beta = -\frac{\partial}{\partial \delta} \frac{P}{S_t} \text{ sign}$$

$$k_E = \frac{E_a}{E_b}, k_X = \frac{X_a}{X_b}$$

FIG.2b

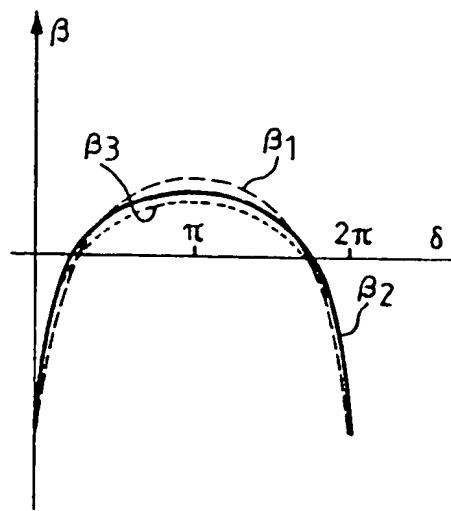


FIG.3

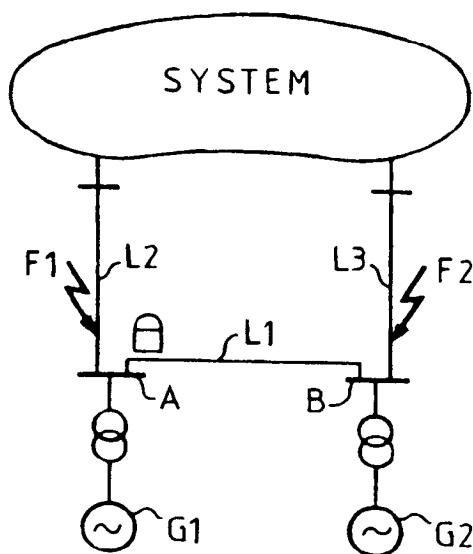
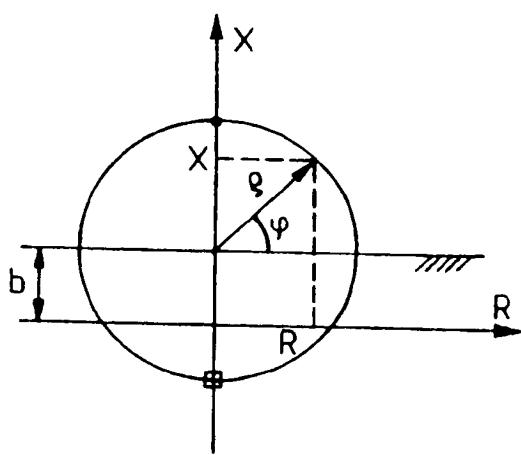


FIG.5



$$\begin{aligned}
 R(t) &= \rho \cos \varphi \\
 X(t) &= \rho \sin \varphi + b \\
 \frac{dR}{dt} &= -\rho \sin \varphi \frac{d\varphi}{dt} \\
 \frac{dX}{dt} &= +\rho \cos \varphi \frac{d\varphi}{dt}
 \end{aligned}$$

FIG.4a

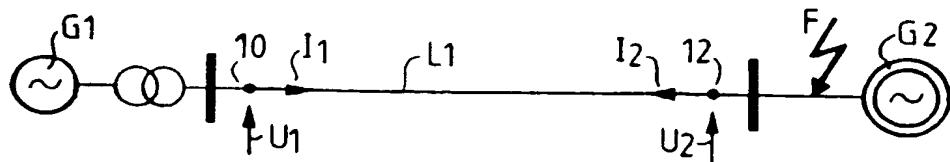


FIG.4b

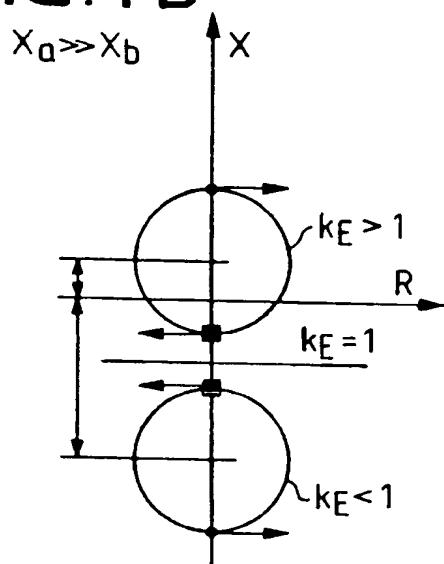


FIG.4c

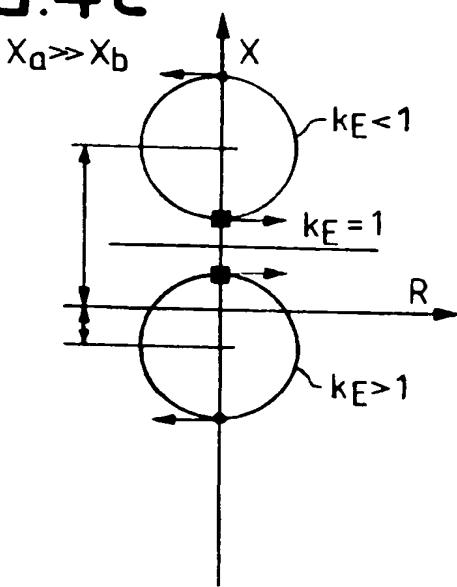


FIG.4d

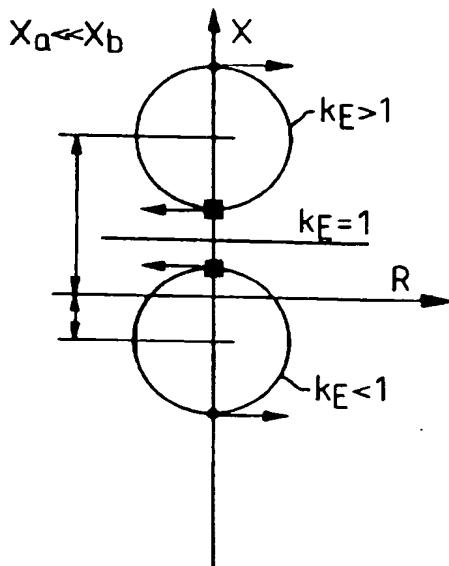


FIG.4e

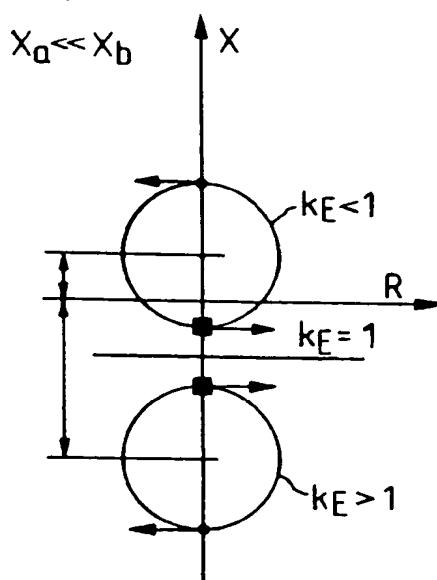


FIG.6a

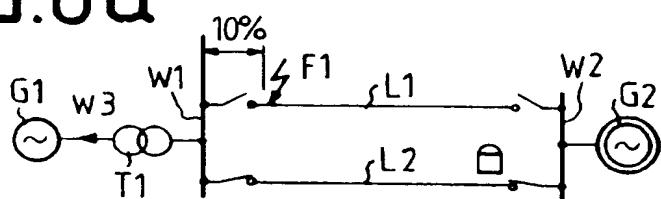


FIG.6b

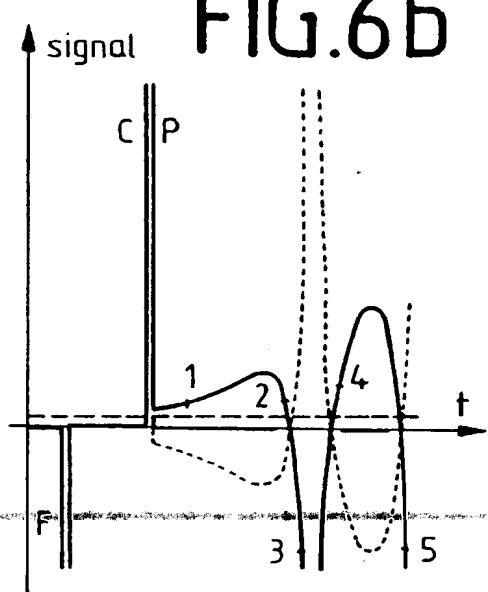


FIG.6c

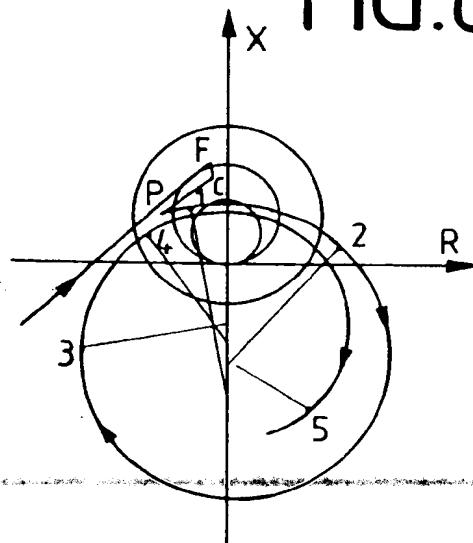


FIG.6d

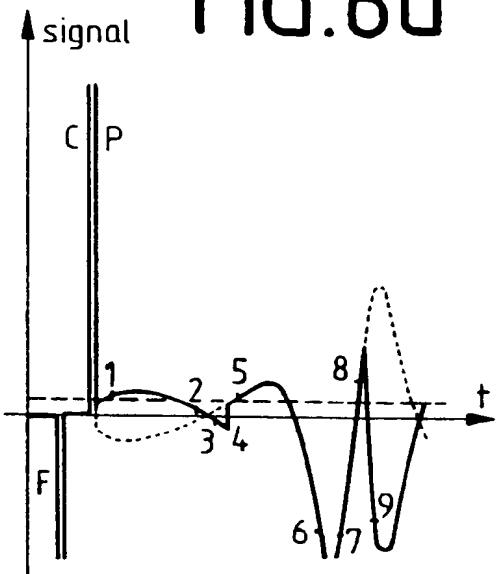


FIG.6e

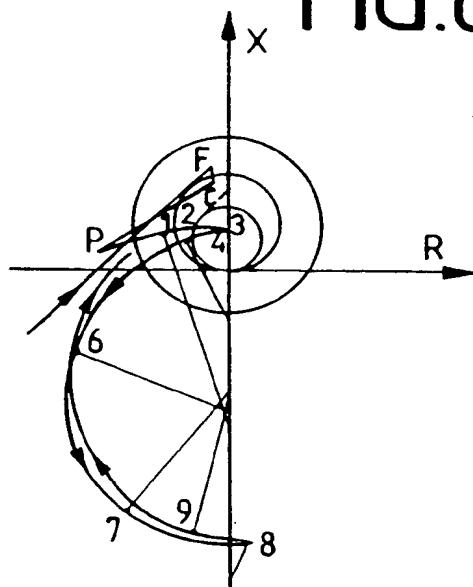


FIG.7

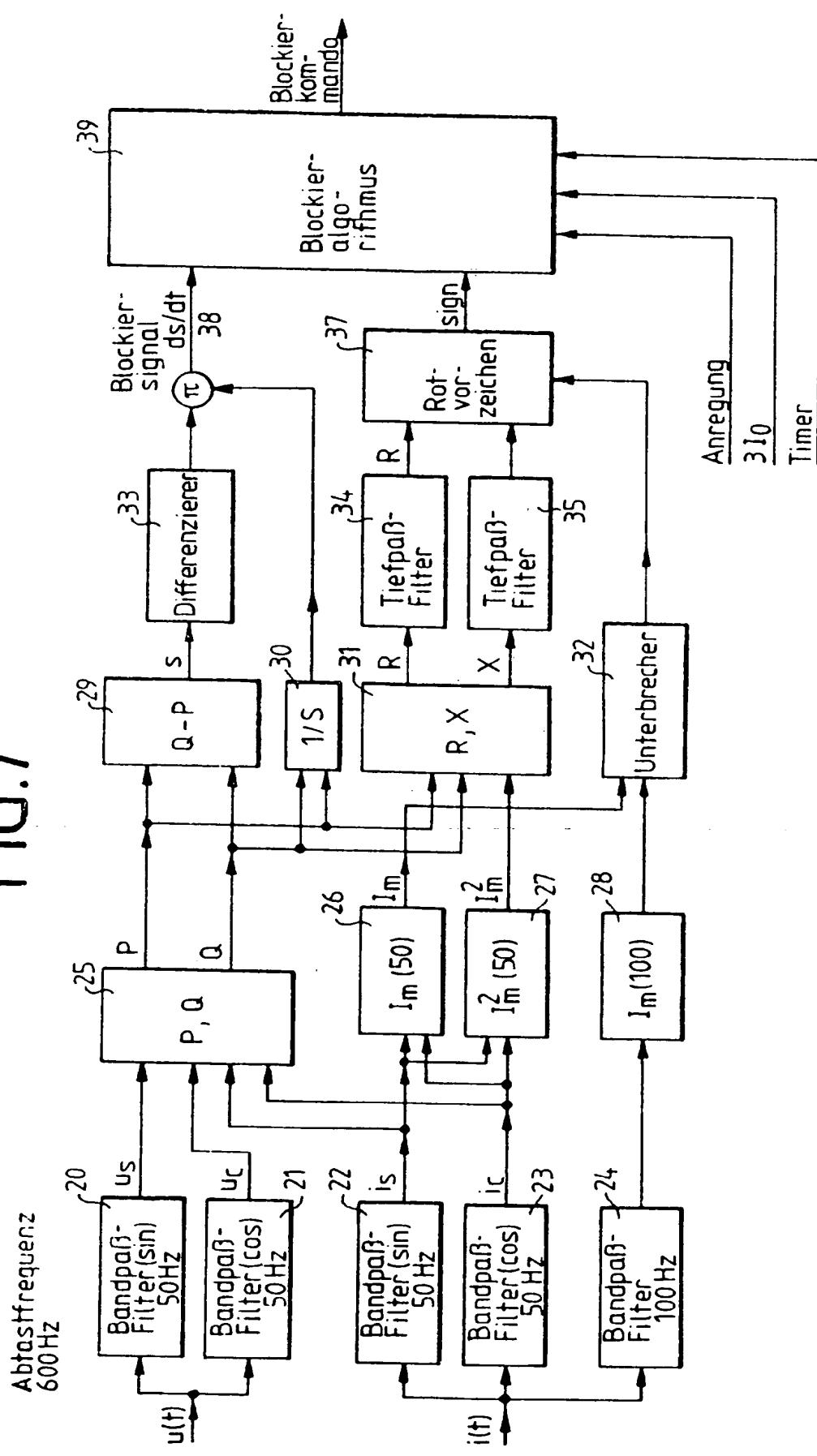


FIG. 8

